基于RWEQ模型的疏勒河流域防风固沙功能价值评估

蔺阿荣[1]， 周冬梅[2]， 马 静[2]， 朱小燕[2]， 江 晶[1]， 张 军[2,3]
（1. 甘肃农业大学管理学院，甘肃 兰州 730070；2. 甘肃农业大学资源与环境学院，甘肃 兰州 730070；
3. 甘肃省节水农业工程技术研究中心，甘肃 兰州 730070）

摘 要：疏勒河流域地处西北内陆，是“一带一路”的关键节点。近年来随着全球变化与经济社会活动强度增加，导致建设用地快速扩张、土地沙化等问题，影响区域生态与经济社会的可持续发展。疏勒河流域处于北方防沙带中心，开展其防风固沙价值评估对于构建区域生态安全格局和保障流域可持续发展具有重要生态意义。基于修正风蚀方程模型（RWEQ）对2008—2018年疏勒河流域防风固沙功能及其价值进行评估。结果表明：（1）2008—2018年疏勒河流域防风固沙总量为43.927×10^4~129.530×10^4 $t\cdot km^{-2}$，防风固沙量呈上升趋势。（2）2008—2018年疏勒河流域防风固沙价值快速增加，其多年平均价值占比由高到低依次为减少土地损失价值（99.46%）、保持土壤肥力价值（0.47%）、保持土壤有机质价值（0.04%）、减少交通运输经济损失价值（0.03%）。（3）流域防风固沙功能与土地利用密切相关，防风固沙能力较强的区域主要分布在草地、耕地等植被覆盖率较高区域；低值区主要分布在流域土地利用类型为未利用地区域。（4）相较社会因素，自然指标因子对流域防风固沙功能价值影响更大。研究结果可为确定流域生态补偿主客体及补偿标准提供依据。

关 键 词：防风固沙服务；修正的土壤风蚀方程（RWEQ）；价值评估；疏勒河流域
文章编号：1000－6060(2024)01－0058－10(0058～0067)

防风固沙是干旱内陆河流域重要的生态功能之一，防风固沙功能在一定程度上反映了干旱、半干旱地区生态系统的稳定性。风蚀是指在风力作用下地表物质被侵蚀、磨蚀并搬运的过程，其发生极易造成土壤养分和有机物的流失进而导致土地荒漠化。截至2019年，中国荒漠化土地面积约为257.37×10^4 km^2，占国土面积的26.8%，而沙化土地面积168.78×10^4 km^2，占国土面积的17.6%[1]。干旱区沙漠化以及其为人类提供生态服务能力的消减严重威胁到全人类的生存和发展，关于该问题的研究引起越来越多学者的关注[2]。疏勒河流域地处西北内陆，是河西走廊内流水系的第二大河，同时也是“一带一路”的关键节点，是典型的生态系统脆弱区[3-4]。受全球变化影响，祁连山脉为其提供充足的冰川融水，因此近年来河流上游山区径流量明显增多，人工绿洲面积得以迅速扩张。过快地扩张使原本脆弱的流域出现中下游河流断流、湿地萎缩、植被退化、土地沙化和盐渍化等问题，生态环境问题日益突出[5-6]。因此，对该流域开展防风固沙服务功能研究及价值评估对于确定流域生态补偿，加强生态环境保护具有重要作用。

防风固沙功能指生态系统通过其结构与过程减少风蚀导致的土壤侵蚀作用，从而降低或避免土壤被风蚀后产生沙尘天气带来的有害影响，这种保持土壤、抑制风蚀过程的功能即为防风固沙功能[7]，它作为一项为风蚀地区生态系统提供服务的重要防护型举措，对风蚀发生地与周边地区风沙灾害治理、生态环境恢复具有重要意义。目前，对该项服

收稿日期：2023-07-02； **修订日期**：2023-09-13
基金项目：甘肃省科技厅重点研发计划-农业领域（23YFNA0036）；甘肃省自然科学基金项目（21JR7RA811）；甘肃省林业和草原科技创新计划（LCKJCX202205）；国家重点研发项目课题（2022YFD1900203）资助
作者简介：蔺阿荣（1999-），女，硕士研究生，主要从事生态系统服务方面的研究. E-mail: linarong2023@163.com
通讯作者：张军（1977-），男，博士，教授，主要从事生态系统服务和土地资源管理等方面的研究. E-mail: zhangjun@gsau.edu.cn

务使用的模型，常见的有Bagnold等提出的输沙模型[8]、风蚀模型(WEQ)[9]、德克萨斯侵蚀风蚀模型(TEAM)[10]、Bocharov等提出的描述模型[11]、风蚀随机仿真模型(WESS)[12]、修正风蚀方程模型(RWEQ)[13-14]、风蚀预报系统(WEPS)[15]。RWEQ模型因运算简单，所需数据量少，以及综合考虑了各项因子对风蚀的影响，被不断验证并广泛应用于防风固沙方面的研究[16-20]。

本研究以疏勒河流域为研究对象，利用RWEQ模型对疏勒河流域2008、2013年和2018年防风固沙量进行估算，根据获得的防风固沙量从4个方面对防风固沙功能进行价值评估，为该流域生态环境保护及未来生态补偿政策制定提供科学依据。

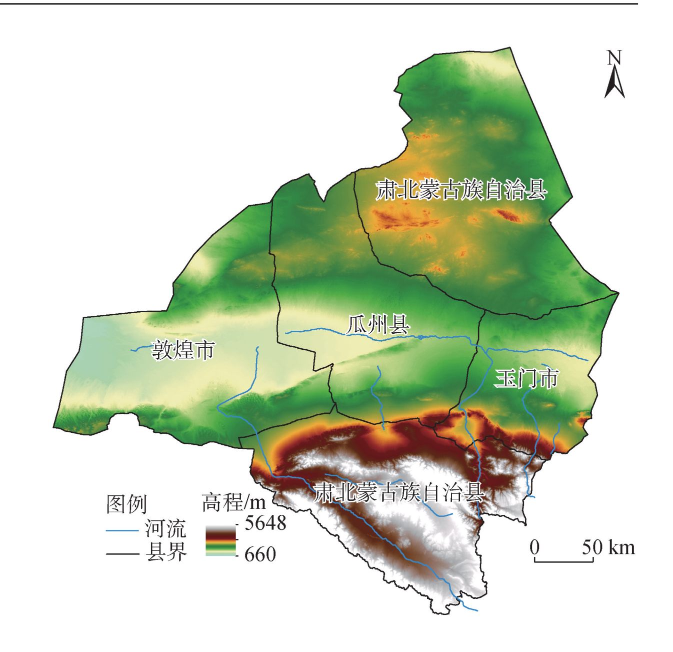
1 数据与方法

1.1 研究区概况

疏勒河流域位于中纬度北温带(92°11′~98°30′E，38°00′~42°48′N)，是河西走廊三大内陆河流域之一，也是西北地区重要的生态屏障。流域总面积为1.28×10^5 km²，海拔791~5569 m[21]，地势总体呈南高北低(图1)。疏勒河发源于祁连山脉托勒南山与疏勒南山之间，向西流经肃北蒙古族自治县、玉门市、瓜州县和敦煌市；属典型大陆性干旱气候，年平均降水量不足70 mm；蒸发强烈、日照时间长，蒸发量达3000 mm以上；冬冷夏热温差大，秋凉春旱多风沙，大风高发期集中在3—6月，主导风向为西南风，最大风速为26 m·s⁻¹；主要土壤类型为沼泽土、草甸土和棕漠土[22]。

1.2 数据来源

本研究气候因子数据来源于国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn)提供的2008、2013年和2018年的中国气象同化驱动数据集(CMADS)；雪盖因子来源于中国西部环境与生态科学数据中心(http://westdc.westgis.ac.cn)提供的1978—2021年的逐日积雪厚度分布，空间分辨率为1 km[23]；土壤数据来源于中国西部环境与生态科学数据中心(http://westdc.westgis.ac.cn)，空间分辨率为1:1000000；数字高程模型(DEM)数据来源于地理空间数据云；归一化植被指数(NDVI)数据来源于美国国家航空航天局(http://edcimswww.cr.usgs.gov)；土地利用数据来源于全国地理信息资源目录服务系统提供的30 m分辨率全球地表覆盖数据(GlobeLand30)。在模型运算过



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2020)4619号标准地图制作，底图边界无修改。下同。

图1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

程中，所有栅格数据均采用WGS_1984_UTM_Zone_47N投影，空间分辨率为100 m。

1.3 研究方法

1.3.1 防风固沙量估算 本研究使用的RWEQ模型综合考虑了气候、土壤、植被和地形等因素，利用裸土条件下的潜在风蚀量和植被覆盖条件下的实际风蚀量之间的差值计算防风固沙物质量[24]，具体计算公式如下：

$$G = SL_r - SL \tag{1}$$

$$SL_r = \frac{2z}{sr^2} \times Qr_{max} \times e^{-\left(\frac{z}{sr}\right)^2} \tag{2}$$

$$Qr_{max} = 109.8 \times (WF \times EF \times SCF \times K') \tag{3}$$

$$sr = 150.71 \times (WF \times EF \times SCF \times K')^{-0.3711} \tag{4}$$

$$SL = \frac{2z}{s^2} \times Q_{max} \times e^{-\left(\frac{z}{s}\right)^2} \tag{5}$$

$$Q_{max} = 109.8 \times (WF \times EF \times SCF \times K' \times C) \tag{6}$$

$$s = 150.71 \times (WF \times EF \times SCF \times K' \times C)^{-0.3711} \tag{7}$$

式中：G为单位面积年防风固沙物质量(kg·m⁻²)；SL_r为单位面积年潜在风蚀量(kg·m⁻²)；SL为单位面积年实际风蚀量(kg·m⁻²)；Qr_{max}为潜在风力的最大输沙能力(kg·m⁻¹)；z为下风向距离(m)，本次计算取值50 m；sr为潜在风蚀量(kg·m⁻¹)；Q_{max}为风力的最大输沙能力(kg·m⁻¹)；WF为气候因子(kg·m⁻¹)；EF为

土壤可蚀性因子；SCF为土壤结皮因子；K'为土壤糙度因子；s为关键地块长度(m)；C为植被因子；。

（1）气候因子（WF）。表征了在考虑降雨、温度、日照及雪盖等因素条件下风力对土壤颗粒的搬运能力，其表达式如下：

$$\mathrm{WF} = \mathrm{wf} \times \frac{\rho}{g} \times \mathrm{SW} \times \mathrm{SD} \tag{8}$$

$$\mathrm{wf} = U_2 \times (U_2 - U_1)^2 \times N_{\mathrm{d}} \tag{9}$$

式中：wf为风力因子($\mathrm{m \cdot s^{-3}}$)；ρ为空气密度($\mathrm{kg \cdot m^{-3}}$)；g为重力加速度，取值9.8 $\mathrm{m \cdot s^{-2}}$；SW为土壤湿度因子；SD为雪盖因子(无积雪覆盖天数/研究总天数)；U_2为2 m处风速($\mathrm{m \cdot s^{-1}}$)；U_1为2 m处临界风速(假定为5 $\mathrm{m \cdot s^{-1}}$)[25]；N_{d}为试验的天数(d)。

（2）土壤可蚀性因子（EF）

$$\mathrm{EF} = (29.09 + 0.31\mathrm{Sa} + 0.17\mathrm{Si} + 0.33\frac{\mathrm{Sa}}{\mathrm{Cl}} - 2.59\mathrm{OM} - 0.95\mathrm{CaCO_3})/100 \tag{10}$$

式中：Sa为土壤砂粒含量(%)；Si为土壤粉砂含量(%)；Cl为土壤粘粒含量(%)；OM为土壤有机质含量(%)，由土壤有机碳含量乘以1.724计算获得[26]；$CaCO_3$为碳酸钙含量(%)。

（3）土壤结皮因子（SCF）

$$\mathrm{SCF} = 1/(1 + 0.0066\mathrm{Cl}^2 + 0.021\mathrm{OM}^2) \tag{11}$$

（4）土壤糙度因子（K'）

$$K' = \cos\alpha \tag{12}$$

式中：α为地形坡度，利用ArcGIS 10.2软件中坡度(slope)模块计算获得[27]。

（5）植被因子(C)

$$C = \mathrm{e}^{-0.0438\mathrm{SC}} \tag{13}$$

$$\mathrm{SC} = \frac{\mathrm{NDVI} - \mathrm{NDVI_{min}}}{\mathrm{NDVI_{max}} - \mathrm{NDVI_{min}}} \tag{14}$$

式中：SC为植被覆盖度(%)；NDVI、$\mathrm{NDVI_{max}}$、$\mathrm{NDVI_{min}}$分别为NDVI实际值、最大值和最小值。

1.3.2 防风固沙价值计算 防风固沙价值(V,元)被划分为减少土地损失价值(V_1,元)、保持土壤肥力价值(V_2,元)、保持土壤有机质价值(V_3,元)、减少交通运输经济损失价值(V_4,元)4种类型：

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 \tag{15}$$

（1）减少土地损失价值(V_1)

$$V_1 = A \times P_{\mathrm{L}} \tag{16}$$

$$A = Q_{\mathrm{c}}/(h \times b) \tag{17}$$

式中：A为保持表土面积($\mathrm{km^2}$)；P_{L}为单位面积土地的机会成本，本文以2018年研究区单位面积GDP作为土地的机会成本，取值47.75×10⁴元·$\mathrm{km^{-2}}$；Q_{c}为防风固沙量(kg)；h为土壤层厚度(cm)，取值20 cm；b为土壤容重($\mathrm{g \cdot cm^{-3}}$)，取值1.40 $\mathrm{g \cdot cm^{-3}}$。

（2）保持土壤肥力价值(V_2)

$$V_2 = Q_{\mathrm{c}} \sum_{i=1}^{3} S_i \times P_i / K_i \tag{18}$$

式中：i=1, 2, 3分别代表N、P、K元素；S_i为土壤中i类元素含量，N、P、K分别为0.09%、0.08%和1.54%[28]，尿素、过磷酸钙和氯化钾3种化肥中N、P、K所占比例，分别为23.33%、24.6%和52.41%；P_i为化肥市场价格(元·$\mathrm{t^{-1}}$)，以尿素、过磷酸钙和氯化钾2018年的全国平均零售价格作为计算依据，分别为2200元·$\mathrm{t^{-1}}$、735元·$\mathrm{t^{-1}}$、2400元·$\mathrm{t^{-1}}$；K_i为化肥中i类元素含量(%)。

（3）保持土壤有机质价值(V_3)

$$V_3 = Q_{\mathrm{c}} \times S_{\mathrm{c}} \times P_{\mathrm{c}} \tag{19}$$

式中：S_{c}为土壤中有机质含量，取值1.23%[28]；P_{c}为有机质价格，取值550元·$\mathrm{t^{-1}}$。

（4）减少交通运输经济损失价值(V_4)

$$V_4 = Q_{\mathrm{c}} \div r \times w \tag{20}$$

式中：r为沙物质容重($\mathrm{g \cdot cm^{-3}}$)，取值1.35 $\mathrm{g \cdot cm^{-3}}$；w为单位清理流沙成本(元·$\mathrm{m^{-3}}$)。2018年河道清淤的定额为：在内陆工程、水域面积小于5×10⁴ $\mathrm{m^2}$的河道清淤中，挖泥机清淤的人力价格6.5元·$\mathrm{m^{-3}}$。

1.3.3 防风固沙服务驱动因素分析 主成分分析法是通过降维思想，利用统计学原理处理复杂、多维的数据，得到少数几个包含所有因子大部分信息，而且所包含的信息也不会互相重复的综合指标[29]。本文根据研究区自然环境特征及社会环境状况选取了包括植被覆盖度、土壤湿度、人均GDP和人口密度等在内的6项指标(表1)，评价各指标因子与防风固沙服务功能间的定量关系。

2 结果与分析

2.1 疏勒河流域土地利用时空动态

根据GlobalLand30提供的全球土地利用数据分析，疏勒河流域主要土地利用类型为未利用地和草地，分别占总面积的85.6%和9.4%；耕地、林地、水域、建设用地和湿地总占比不足5%。其中，未利用地分布在研究区北部和中部地区，南部也略有分布；草地主要分布在肃北蒙古族自治县南部；农田

表1　疏勒河流域防风固沙功能评价指标体系

Tab. 1　Evaluation index system of wind prevention and sand fixation function in Shule River Basin

分类	指标	编号
自然因素	植被指数/%	X1
	年降水/mm	X2
	年均温度/℃	X3
	土壤湿度/%	X4
社会经济因素	人均GDP/元	X5
	人口密度/人·km^{-2}	X6

生态系统主要分布在研究区中部绿洲区；水域主要分布在肃北蒙古自治县南山地区，水源主要依靠冰川和泉水补给，支流较多(图2)。

数量上(表2)，除未利用地之外疏勒河流域草地占较大比重，2008、2013、2018年占比分别为11.70%、13.01%、12.98%，总体呈波动式增加趋势，到2018年时增加了1488.49 km^2；其次为耕地，所占比例依次为1.21%、1.50%、1.54%，呈持续增长之势；水域呈持续减少趋势，到2018年减少了150.50 km^2；建设用地面积从2008年的7.63 km^{2}增至2018年的9.23 km^2，10 a间增加了1.60 km^2；林地和湿地都呈缓慢增长之势，10 a间分别增加了0.12 km^2、0.05 km^2。

2.2　防风固沙功能

根据疏勒河流域不同地表覆被下各年单位面积防风固沙平均值(表3)可知，2008—2018年疏勒河流域单位面积防风固沙量为129.00~371.35 t·km^{-2}，防风固沙总量为43.93×10^4~129.53×10^4 t·km^{-2}，总体防风固沙量呈上升趋势，与郑续等[30]研究结果一致。

防风固沙能力与地表覆盖物密切相关，林地防风固沙能力最强，但林地面积仅占研究区总面积的0.02%，流域防风固沙能力以草地为主，2008—2018年研究区草地年均防风固沙量高达68.22×10^4 t·km^{-2}，其次为耕地、水域、林地，分别为23.03×10^4 t·km^{-2}、1.14×10^4 t·km^{-2}、0.02×10^4 t·km^{-2}。

空间上，疏勒河流域防风固沙能力总体表现为南部草地、中部耕地以及西北部草地普遍高于流域其他地区的空间分布格局，高值区分布较为零散稀疏(图3)。2008—2018年玉门市单位面积防风固沙量一直较其他市县固沙量较高，数值均在38 t·km^{-2}上；肃北和敦煌单位防风固沙量较低，10 a来单位面积防风固沙量均在20 t·km^{-2}以下。此外，较其他市县，10 a间肃北南部防风固沙能力逐渐增强，较2008年和2013年防风固沙量增长4倍。2013—2018年肃北南部防风固沙增长6.69 t·km^{-2}。

2008—2018年疏勒河流域防风固沙能力增强，潜在防风固沙量和实际防风固沙量皆呈不同程度的上升趋势(表3)。这可能与这一时期生态保护政策有关，自“十三五”规划以来，酒泉市完成营造林12.57×10^8 hm^2，治理沙化土地32.27×10^4 hm^2，且该市积极聚焦绿色发展，构建循环农业体系，探索培育全链生态循环发展新模式，扶持并壮大种业、蔬菜、草食畜牧三大产业，提高了该流域防风固沙的能力。

2.3　防风固沙保有率

2008—2018年疏勒河流域防风固沙保有率总体呈增长之势(图4)，其中肃北县南部、玉门市及瓜州县增加趋势明显。以2013年为研究节点，发现不同时段内，防风固沙保有率存在差异：2008—2013

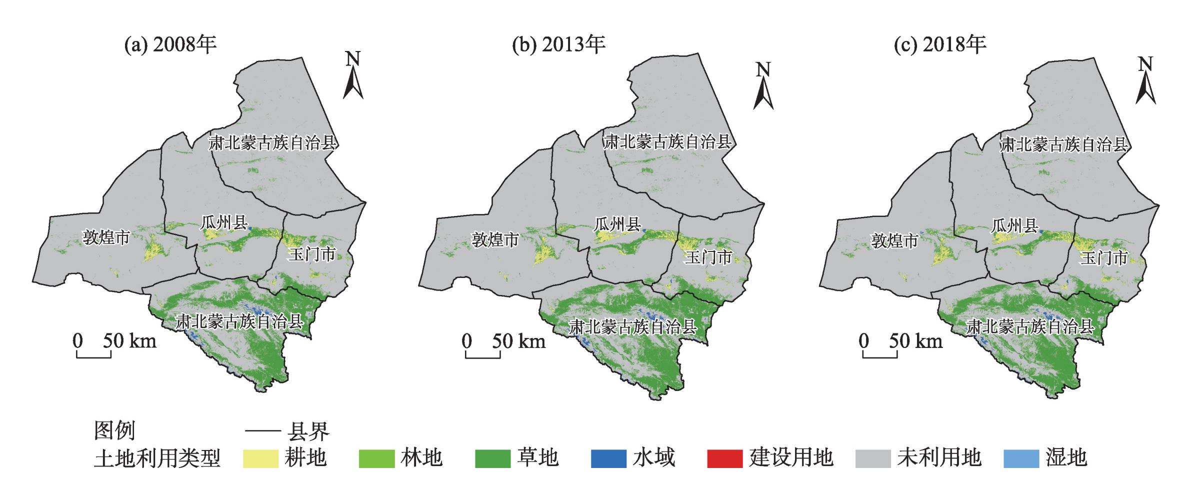


图2　2008—2018年疏勒河流域土地利用

Fig. 2　Land use in the Shule River Basin from 2008 to 2018

表2 2008—2018年疏勒河流域土地利用变化特征

Tab. 2 Land use change in Shule River Basin from 2008 to 2018

土地利用类型	2008年		2013年		2018年		2008—2018年
	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%	增减量/km²
耕地	1405.94	1.21	1744.23	1.50	1788.95	1.54	383.01
林地	2.54	0.00	2.56	0.00	2.66	0.00	0.12
草地	13600.37	11.70	15125.72	13.01	15088.86	12.98	1488.49
水域	573.78	0.49	481.83	0.41	423.28	0.36	−150.50
建设用地	7.63	0.01	8.27	0.01	9.23	0.01	1.60
未利用地	100637.66	86.59	98865.29	85.06	98914.89	85.10	−1722.77
湿地	0.03	0.00	0.04	0.00	0.08	0.00	0.05

表3 2008—2018年疏勒河流域防风固沙服务

Tab. 3 Wind prevention and sand fixation services in the Shule River Basin from 2008 to 2018

年份	土地利用类型	面积/km²	防风固沙量/10^4 t·km^{-2}	单位面积潜在防风固沙量/10^4 t·km^{-2}	单位面积实际防风固沙量/10^4 t·km^{-2}	单位面积防风固沙量/t·km^{-2}
2008	耕地	1405.94	1.84	0.18	0.18	13.08
	林地	2.54	0.02	0.44	0.43	68.90
	草地	13600.37	41.39	0.16	0.16	30.43
	湿地	0.03	0.00	0.05	0.05	4.74
	水域	573.78	0.68	0.13	0.13	11.85
	总计	15582.66	43.93	0.96	0.95	129.00
2013	耕地	1744.23	34.13	0.56	0.54	195.70
	林地	2.56	0.02	0.41	0.41	69.21
	草地	15125.72	68.29	0.23	0.22	45.15
	湿地	0.04	0.00	0.07	0.06	15.07
	水域	481.83	1.32	0.31	0.31	27.36
	总计	17354.38	103.76	1.58	1.54	352.49
2018	耕地	1788.95	33.13	0.54	0.52	185.22
	林地	2.66	0.02	0.42	0.42	77.25
	草地	15088.86	94.97	0.27	0.27	62.94
	湿地	0.08	0.00	0.07	0.07	12.73
	水域	423.28	1.41	0.37	0.37	33.21
	总计	17303.83	129.53	1.67	1.65	371.35

年疏勒河流域大部分市县防风固沙保有率呈增长趋势，其中玉门市和瓜州县呈显著增长之势；2013—2018年肃北县北部和敦煌市呈降低趋势，说明该时段内植被对该服务的影响减弱。

2.4 防风固沙功能价值

对疏勒河流域植被的防风固沙功能进行价值评估（表4），该流域植被生态系统具有重要的保持土壤肥力和减少土地损失价值。2008、2013年和2018年，区域防风固沙总价值分别达到741.559×10^4元、1756.590×10^4元和2196.925×10^4元。从生态系统服务防风固沙价值的构成来看，减少土地损失价值所占比例最高，达98%以上，其次分别为保持土壤肥力价值、保持土壤有机质价值和减少交通运输经济损失价值，这3项所占比重不到2%。

2.5 防风固沙服务影响因素

通过SPSS 25.0软件计算得出的特征值、贡献率及累计贡献率对疏勒河流域2008—2018年防风固沙功能驱动因子进行分析。第一个主成分特征值为4.559，包含的信息占所有指标的75.977%；第二个主成分特征值为1.038，包含的信息占所有指标的12.471%。得到的2个主成分可以反映88.448%的信息，超过85%，因此符合要求，可以将这2个因子

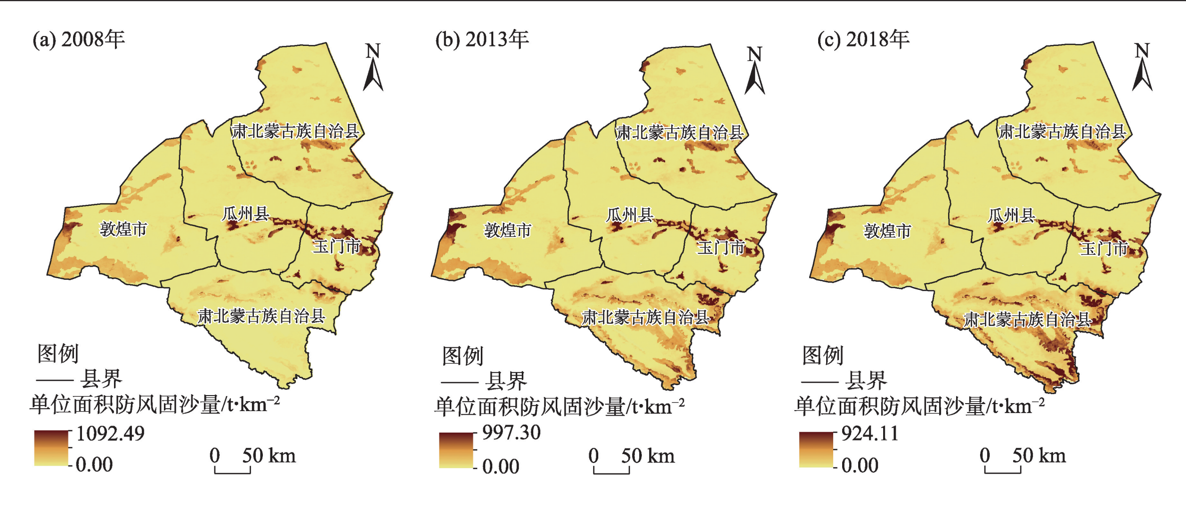


图3　2008—2018年单位面积防风固沙量

Fig. 3　Wind prevention and sand fixation capacity per unit area from 2008 to 2018

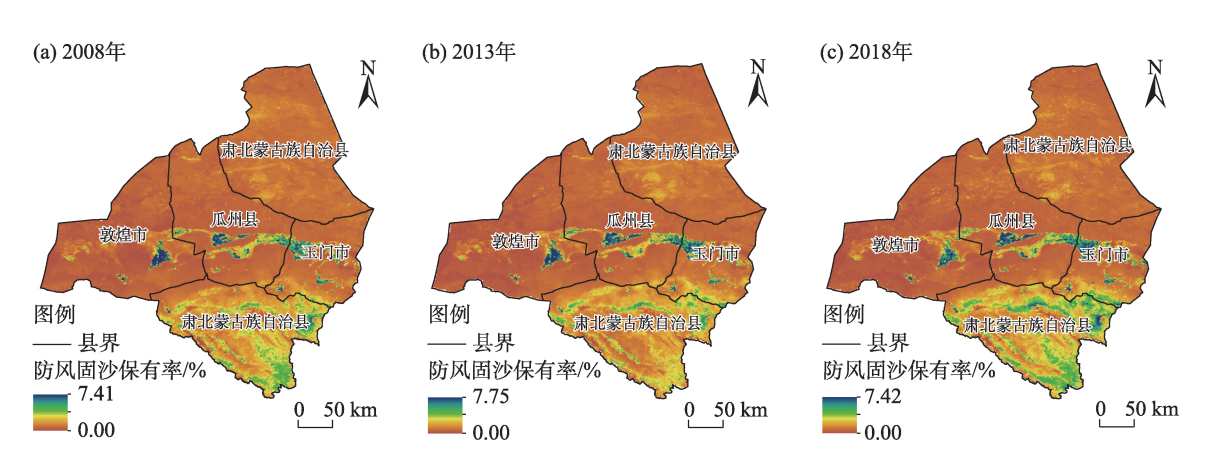


图4　2008—2018年防风固沙保有率

Fig. 4　Retention rate of wind prevention and sand fixation from 2008 to 2018

表4　疏勒河流域防风固沙价值构成

Tab. 4　Value composition of wind prevention and sand fixation in Shule River Basin

/10^4元

年份	减少土地损失价值	保持土壤肥力价值	保持土壤有机质价值	减少交通运输经济损失的价值	总价值
2008	737.538	3.520	0.293	0.208	741.559
2013	1747.065	8.339	0.693	0.493	1756.590
2018	2185.012	10.429	0.867	0.617	2196.925

成分作为疏勒河流域防风固沙服务功能变化的主成分，并据此得到主成分载荷矩阵（表5）。

由表6可知，植被指数、人口密度及土壤湿度在主成分1中作用明显，表明提高植被覆盖率，可以有效增强土壤蓄水能力，减小大风等恶劣天气对地表的侵蚀，增强流域防风固沙能力。在主成分2中占比最大的是年均温度；而人均GDP和人口密度等因素相对较弱，这说明疏勒河流域防风固沙功能的强弱主要跟自然因素有关。因此，改善流域生态环境质量，减少沙尘等恶劣天气，重在保护生态环境，提高植被覆盖率。

根据主成分F1和F2得分贡献率，计算得出综合得分F（表7）。如果综合得分为正，表明防风固沙能力增强，生态环境得以保护；反之，综合得分为负，得分越低，表明防风固沙能力较差，生态环境问题突出，应引起人们的高度重视。

表5 主成分特征值与贡献率

Tab. 5 Eigenvalues and contribution rates of principal component

成分	初始特征值			提取载荷平方和		
	总计	方差百分比/%	累计贡献率/%	总计	方差百分比/%	累计贡献率/%
1	4.559	75.977	75.977	4.559	75.977	75.977
2	1.038	12.471	88.448	1.038	12.471	88.448
3	0.325	6.616	95.064			
4	0.115	3.109	98.172			
5	0.009	1.356	99.529			
6	−0.045	0.471	100.000			

表6 主成分荷载矩阵

Tab. 6 Principal component load matrix

变量	主成分1	主成分2
X1	0.927	0.086
X2	0.855	−0.198
X3	0.766	0.582
X4	0.891	0.318
X5	0.849	−0.386
X6	0.931	−0.336

表7 防风固沙功能综合评价

Tab. 7 Comprehensive evaluation of wind prevention and sand fixation function

年份	F1	F2	F	排序
2008	−4.14	0.64	−3.07	11
2009	−3.01	0.89	−2.18	10
2010	−1.11	−0.63	−0.92	9
2011	−0.35	−0.75	−0.36	7
2012	−0.80	−1.29	−0.77	8
2013	0.62	−0.65	0.39	6
2014	0.78	−0.22	0.56	5
2015	1.57	0.73	1.29	4
2016	2.35	0.47	1.84	1
2017	1.99	0.47	1.57	3
2018	2.10	0.35	1.64	2

注:F1为第一主成分得分;F2为第二主成分得分;F为综合得分。

由表7可知,2008—2018年疏勒河流域防风固沙能力总体呈上升趋势,由《中央生态环境保护督察工作规定》等政策引导,酒泉市不断加强生态文明建设,并利用制度推动生态文明建设,使流域生态环境得以恢复与发展。第一主成分和防风固沙能力的总趋势基本保持一致,主要是因为第一主成分包含了75.977%的变化率,是影响该流域防风固沙能力的主要因子。第一主成分是自然和社会因子共同作用后的结果,防风固沙功能主要受植被指数和人口密度影响。第二主成分变动较大,先后经历了上升、下降、再上升的阶段,这与疏勒河流域年均温度,土壤湿度有较强的相关性。疏勒河流域必须采取积极措施,保持土壤水分含量,增加土壤颗粒凝聚力,进一步提高生态系统防风固沙能力。

3 讨论

疏勒河流域单位面积防风固沙量总体呈上升趋势,主要与流域内土地利用方式有关,自“十三五”规划以来,酒泉市积极响应政策,聚焦绿色发展,先后完成营造林12.57×10^8 hm^2,治理沙化土地32.27×10^4 hm^2。植被覆盖率地提高,可以有效增强土壤蓄水能力,减小大风等恶劣天气对地表的侵蚀,增强流域防风固沙能力。从疏勒河流域防风固沙保有率及土地利用变化趋势上来看,土地覆盖的变化对固沙的贡献率整体是上升的,该结论与前人研究相一致[31]。

从主成分分析结果上看,温度、降水等气候因素对流域防风固沙服务的影响普遍较强,气候变化是影响流域土壤风蚀的主导因素[32-33]。其中,雨量的增加可有效使土壤颗粒间形成毛细作用力增强土壤凝聚力[34]促进区域植被生长,增强地表对风蚀的抵抗力[35],而温度的升高会导致蒸散量升高使土壤湿度降低,地表更加干燥,极易发生风蚀[36]。除气候因素外,植被指数因子对防风固沙功能也具有较大影响,植被可增强土壤抗侵蚀能力同时会影响区域环境如温度、土壤湿度、蒸散发等[37]。肃北蒙古族自治县以南覆盖有大面积的草地,草地生态系统具有防风固沙、涵养水源、增强土壤有机质含量等功能,这可能是造成疏勒河流域防风固沙功能存

在空间差异的主要原因。

本文针对疏勒河流域防风固沙服务功能及价值评估进行了有益探索和尝试。在模型运行时，参考相关学者的研究成果[18,25,38-39]对模型中的一些参数和因子进行了处理，如，在计算单位面积年潜在风蚀量时，下风向距离参考相关研究取值为50 m，这对于小流域尺度范围的研究区域而言，这样的取值是否合适仍需进一步研究。综合植被因子是倒伏残茬、直立和作物覆盖3个因子乘积获得的结果[15]，但在计算时，考虑到疏勒河流域因生活需要，农作物收获后会直接将秸秆、残茬加工成牲畜饲料，因此无法获取对应时段内的倒伏残茬数据，所以本文采用现有的NDVI数据对植被因子数据进行替换，可能也对最终结果产生了影响。气象因子数据为研究时段内日均站点数据，难以对瞬时发生的降雨及风速数据进行准确监测，因此今后需采用多源数据相结合的方式来获取分辨率更高的气象数据[40]从而避免对土壤风蚀速率的粗糙评估，为确定流域生态补偿主客体及补偿标准提供依据。

4 结 论

（1）2008—2018年疏勒河流域防风固沙功能总体呈增长趋势。期间，潜在防风固沙量与实际防风固沙量增速幅度相差较小，流域总的防风固沙量变化差距较大，由2008年的43.927×10^4 $t\cdot km^{-2}$增长至2018年的129.530×10^4 $t\cdot km^{-2}$，这主要与期间土地利用方式有关。10 a间，耕地、草地面积都呈增长之势，未利用地及水域面积呈减少之势。

（2）2008—2018年疏勒河流域防风固沙价值由741.559×10^4元增长至2196.925×10^4元，其中减少土地损失价值>保持土壤肥力价值>保持土壤有机质价值>减少交通运输经济损失价值。

（3）疏勒河流域防风固沙功能空间分布差异性明显。防风固沙能力较强的区域主要分布在肃北蒙古自治县东南部、瓜州县和玉门市中部、敦煌市西北部及肃北自治县北部；防风固沙能力低值区主要分布在肃北蒙古自治县北部和南部、瓜州县北部和南部、玉门市及敦煌市大部分地区。

（4）自然因素中植被指数因子较其他因子对防风固沙功能作用最大，表明植被对减小风速、稳定流沙具有重要作用。

参考文献（References）

[1] 崔桂鹏, 肖春蕾, 雷加强, 等. 大国治理: 中国荒漠化防治的战略选择与未来愿景[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(7): 943-955. [Cui Guipeng, Xiao Chunlei, Lei Jiaqiang, et al. China's governance: Strategy choice and future vision for combating desertification[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(7): 943-955.]

[2] Li D J, Xu D Y. Sand fixation function response to climate change and land use in northern China from 1981 to 2015[J]. Aeolian Research, 2019, 40: 23-33.

[3] 周凡, 周冬梅, 金银丽, 等. 疏勒河流域生态系统服务供需空间匹配特征[J]. 干旱区地理, 2023, 46(3): 471-480. [Zhou Fan, Zhou Dongmei, Jin Yinli, et al. Spatial matching characteristics of supply and demand of ecosystem services in the Shule River Basin[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(3): 471-480.]

[4] 杨静, 周冬梅, 马静, 等. 疏勒河流域农业水土资源时空匹配特征分析[J]. 干旱区地理, 2023, 46(6): 982-992. [Yang Jing, Zhou Dongmei, Ma Jing, et al. Spatial and temporal matching characteristics of agricultural land and water resources in the Shule River Basin[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(6): 982-992.]

[5] 潘竟虎, 董磊磊. 2001—2010年疏勒河流域生态系统质量综合评价[J]. 应用生态学报, 2016, 27(9): 2907-2915. [Pan Jinghu, Dong Leilei. Comprehensive evaluation of ecosystem quality in the Shule River Basin, northwest China from 2001 to 2010[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(9): 2907-2915.]

[6] 齐敬辉. 疏勒河流域绿洲生态演变研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2017. [Qi Jinghui. The research on oasis ecological evolution of Shule River Basin[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.]

[7] 赖锋, 乔占明, 熊增连. 青海省风蚀量及防风固沙量时空特征分析[J]. 测绘科学, 2023, 48(1): 148-156. [Lai Feng, Qiao Zhanming, Xiong Zenglian. Spatiotemporal characteristics of wind erosion and wind prevention and sand fixation in Qinghai Province[J]. Science of Surveying and Mapping, 2023, 48(1): 148-156.]

[8] Bagnold R A. A further journey through the Libyan desert[J]. Geographical Journal, 1933, 82(2): 103-126.

[9] Woodruff N P, Siddoway F H. A wind erosion equation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1965, 29(5): 602-608.

[10] Gregory J M, Wilson G R, Singh U B, et al. TEAM: Integrated, process-based wind-erosion model[J]. Environmental Modelling & Software, 2004, 19(2): 205-215.

[11] Bocharov A P. A description of devices used in the study of wind erosion of soils[M]. New Delhi: Oxonian Press, 1984.

[12] Van Pelt R S, Zobeck T M, Potter K N, et al. Validation of the wind erosion stochastic simulator (WESS) and the revised wind erosion equation (RWEQ) for single events[J]. Environmental Modelling & Software, 2004, 19(2): 191-198.

[13] Fryrcar D W, Chen W N, Lester C. Revised wind erosion equation

[J]. Annals of Arid Zone, 2001, 40(3): 265-279.

[14] Fryrear D W, Bilbro J D, Saleh A, et al. RWEQ: Improved wind erosion technology[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 55(2): 183-189.

[15] Hagen L J. Evaluation of the wind erosion prediction system (WEPS) erosion sub model on cropland fields[J]. Environmental Modelling & Software, 2004, 19(2): 171-176.

[16] 巩国丽, 刘纪远, 邵全琴. 基于RWEQ的20世纪90年代以来内蒙古锡林郭勒盟土壤风蚀研究[J]. 地理科学进展, 2014, 33(6): 825-834. [Gong Guoli, Liu Jiyuan, Shao Quanqin. Wind erosion in Xilingol League, Inner Mongolia since the 1990s using the revised wind erosion equation[J]. Progress in Geography, 2014, 33(6): 825-834.]

[17] 王洋洋, 肖玉, 谢高地, 等. 基于RWEQ的宁夏草地防风固沙服务评估[J]. 资源科学, 2019, 41(5): 980-991. [Wang Yangyang, Xiao Yu, Xie Gaodi, et al. Sand-fixing function of the grassland ecosystem in Ningxia based on the revised wind erosion model[J]. Resources Science, 2019, 41(5): 980-991.]

[18] 徐洁, 肖玉, 谢高地, 等. 防风固沙型重点生态功能区防风固沙服务的评估与受益区识别[J]. 生态学报, 2019, 39(16): 5857-5873. [Xu Jie, Xiao Yu, Xie Gaodi, et al. Assessment of wind erosion prevention service and its beneficiary areas identification of national key ecological function zone of windbreak and sand fixation type in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(16): 5857-5873.]

[19] 王蕾, 赵霞, 张琛悦, 等. 基于RWEQ模型的茫崖市防风固沙功能评估及敏感地类识别[J]. 水土保持研究, 2023, 30(1): 144-153. [Wang Lei, Zhao Xia, Zhang Chenyue, et al. Assessment of windbreak and sand fixation function and identification of sensitive land use types in Mangai City based on RWEQ model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(1): 144-153.]

[20] 黄孟冬, 肖玉, 秦克玉, 等. 1980—2018年浑善达克地区防风固沙服务时空变化及其驱动因素[J]. 生态学报, 2022, 42(18): 7612-7629. [Huang Mengdong, Xiao Yu, Qin Keyu, et al. Spatio-temporal dynamics and drivers of wind erosion prevention service in Otindag from 1980 to 2018[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(18): 7612-7629.]

[21] 金银丽, 周冬梅, 周凡, 等. 疏勒河流域生态安全网络构建及优化[J]. 应用生态学报, 2023, 34(4): 1063-1072. [Jin Yinli, Zhou Dongmei, Zhou Fan, et al. Construction and optimization of ecological security network in the Shule River Basin, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(4): 1063-1072.]

[22] 孙旭伟, 李森, 王亚晖, 等. 1975—2020年疏勒河流域绿洲时空变化研究[J]. 生态学报, 2022, 42(22): 9111-9120. [Sun Xuwei, Li Sen, Wang Yahui, et al. Spatiotemporal change of oasis in Shule River Basin during 1975—2020[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(22): 9111-9120.]

[23] Che T, Li X, Jin R, et al. Snow depth derived from passive microwave remote-sensing data in China[J]. Annals of Glaciology, 2008, 49: 145-154.

[24] 巩国丽. 中国北方土壤风蚀时空变化特征及影响因素分析[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014. [Gong Guoli. Analysis of spatio-temporal changes and influencing factors of soil wind erosion in northern China[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014.]

[25] 江凌, 肖燚, 饶恩明, 等. 内蒙古土地利用变化对生态系统防风固沙功能的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(12): 3734-3747. [Jiang Ling, Xiao Yi, Rao Enming, et al. Effects of land use and cover change (LUCC) on ecosystem sand fixing service in Inner Mongolia[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(12): 3734-3747.]

[26] 王炳瑞. 1990—2015年内蒙古中西部地区风力侵蚀和固沙服务评估[D]. 兰州: 兰州大学, 2022. [Wang Bingrui. Assessment of wind erosion and sand-stabilization services in central and western Inner Mongolia from 1990 to 2015[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2022.]

[27] 申陆, 田美荣, 高吉喜, 等. 浑善达克沙漠化防治生态功能区防风固沙功能的时空变化及驱动力[J]. 应用生态学报, 2016, 27(1): 73-82. [Shen Lu, Tian Meirong, Gao Jixi, et al. Spatio-temporal change of sand-fixing function and its driving forces in desertification control ecological function area of Hunshandake, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(1): 73-82.]

[28] 易秀, 李侠. 西北地区土壤资源特征及其开发利用与保护[J]. 地球科学与环境学报, 2004(4): 85-89. [Yi Xiu, Li Xia. Characteristics of soil resources and development and protection in the northwest region[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2004(4): 85-89.]

[29] 苏木亚, 郭崇慧. 基于主成分分析的单变量时间序列聚类方法[J]. 运筹与管理, 2011, 20(6): 66-72. [Su Muya, Guo Chonghui. Univariate time series clustering method based on principal component analysis[J]. Operations Research and Management Science, 2011, 20(6): 66-72.]

[30] 郑续, 魏乐民, 郭建军, 等. 基于地理探测器的干旱区内陆河流域产水量驱动力分析——以疏勒河流域为例[J]. 干旱区地理, 2020, 43(6): 1477-1485. [Zheng Xu, Wei Lemin, Guo Jianjun. Driving force analysis of water yield in inland river basins of arid areas based on geo-detectors: A case of the Shule River[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(6): 1477-1485.]

[31] 黄麟, 祝萍, 肖桐, 等. 近35年三北防护林体系建设工程的防风固沙效应[J]. 地理科学, 2018, 38(4): 600-609. [Huang Lin, Zhu Ping, Xiao Tong, et al. The sand fixation effects of three-north shelter forest program in recent 35 years[J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(4): 600-609.]

[32] Li J, Ma X, Zhang C. Predicting the spatiotemporal variation in soil wind erosion across Central Asia in response to climate change in the 21st century[J]. Science of the Total Environment, 2020, 709: 136060, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.136060.

[33] Zhang H Y, Fan J W, Cao W, et al. Response of wind erosion dynamics to climate change and human activity in Inner Mongolia, China during 1990 to 2015[J]. Science of the Total Environment, 2018, 639: 1038-1050.

[34] Bergametti G, Rajot J L, Pierre C, et al. How long does precipitation inhibit wind erosion in the Sahel?[J]. Geophysical Research Letters, 2016, 43(12): 6643-6649.

[35] Wu X G, Fan J Q, Sun L, et al. Wind erosion and its ecological ef-

fects on soil in the northern piedmont of the Yinshan Mountains [J]. Ecological Indicators, 2021, 128(1): 107825, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.107825.

[36] Li D J, Xu D Y, Wang Z Y, et al. The dynamics of sand-stabilization services in Inner Mongolia, China from 1981 to 2010 and its relationship with climate change and human activities[J]. Ecological Indicators, 2018, 88: 351−360.

[37] Řeháček D, Khel T, Kučera J, et al. Effect of windbreaks on wind speed reduction and soil protection against wind erosion[J]. Soil and Water Research, 2017, 12(2): 128−135.

[38] 彭婉月, 王兆云, 李海东, 等. 黑河中下游防风固沙功能时空变化及影响因子分析[J]. 环境科学研究, 2020, 33(12): 2734−2744. [Peng Wanyue, Wang Zhaoyun, Li Haidong, et al. Spatio-temporal changes of sand-fixing function and its driving forces in the middle and lower reaches of Heihe River Basin[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(12): 2734−2744.]

[39] 邢丽珠, 张方敏, 邢开成, 等. 基于RWEQ模型的内蒙古巴彦淖尔市土壤风蚀变化特征及归因分析[J]. 中国沙漠, 2021, 41(5): 111−119. [Xing Lizhu, Zhang Fangmin, Xing Kaicheng, et al. Change of soil wind erosion and attribution in Bayannur, Inner Mongolia based on the revised wind erosion equation[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(5): 111−119.]

[40] Buschiazzo D E, Zobeck T M. Validation of WEQ, RWEQ and WEPS wind erosion for different arable land management systems in the Argentinean Pampas[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2008, 33(12): 1839−1850.

Evaluation of wind prevention and sand fixation function in Shule River Basin based on RWEQ model

LIN Arong[1], ZHOU Dongmei[2], MA Jing[2], ZHU Xiaoyan[2],
JIANG Jing[1], ZHANG Jun[2,3]

(1. College of Management, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China;
2. College of Resources and Environmental Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China;
3. Research Center for Water Saving Agriculture in Gansu Province, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: The Shule River Basin is located in the northwest inland region of China and is a key node of the Belt and Road Initiative. In recent years, with the increasing intensity of global changes and economic and social activities, problems, such as the rapid expansion of construction land and desertification have affected the sustainable development of regional ecology and economic society. The Shule River Basin is located at the center of the northern sand prevention belt of China, and an evaluation of its wind prevention and sand fixation value is of great ecological significance for building a regional ecological security pattern and ensuring sustainable development of the basin. On the basis of the revised wind erosion equation model, the value of wind prevention and sand fixation in the Shule River Basin from 2008 to 2018 was evaluated. The results are as follows: (1) The total amount of wind prevention and sand fixation in the Shule River Basin from 2008 to 2018 was 43.927×10^4 to 129.530×10^4 $t\cdot km^{-2}$, with an increasing trend in wind prevention and sand fixation capacity. (2) The value of wind prevention and sand fixation in the Shule River Basin rapidly increased from 2008 to 2018, with an annual average value ranging from high to low to reduce the value of land loss (99.46%), maintain the value of soil fertility (0.47%), maintain the value of soil organic matter (0.04%), and reduce the value of economic loss of transportation (0.03%). (3) The function of wind prevention and sand fixation in river basins is closely related to land use. Among them, the areas with stronger windproof and sand-fixing capability are primarily distributed in grassland, cropland, and other areas with higher vegetation cover; the low-value areas are primarily distributed in unused land of the land use type of the river basin. (4) Natural indicator factors have a greater impact on the value of wind and sand fixation functions in river basins than social factors. These findings can provide a basis for determining the subject and object of ecological compensation and compensation standards in the Shule River Basin.

Key words: wind prevention and sand fixation services; revised wind erosion equation (RWEQ); value evaluation; Shule River Basin